第39卷　第5期
2022年9月

干　旱　区　研　究
ARID　ZONE　RESEARCH

Vol. 39　No. 5
Sep. 2022

近60 a伊塞克湖水量平衡变化及影响因素分析

王晓飞[1,2,3]，　黄　粤[1,2]，　刘　铁[1,2]，　李均力[1,2]，　王　正[1,2,3]，
昝婵娟[1,2,3]，　段永超[4]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；
2. 新疆维吾尔自治区遥感与地理信息系统应用重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；
3. 中国科学院大学，北京　100049；4. 无锡学院，江苏 无锡　214105）

摘　要：基于卫星遥感数据，提取近60 a伊塞克湖面积、水位变化信息，反演伊塞克湖水量变化时间序列，结合1960—2020年CRU气象数据、1960—2000年乔尔蓬阿塔气象站气温降水观测数据和入湖水量观测数据，建立湖泊水量平衡模型，分析水量平衡各分量的变化特征，并探讨其影响因素。结果表明：（1）1960年以来伊塞克湖水量变化经历了持续减少-波动增加的过程，1998年为变化的时间拐点；20世纪60—80年代中期，入湖水量主要受灌溉引水影响持续减少，1986年后随灌溉水量减少、降水和冰川融水的增加而转为上升趋势；湖区降水以9.1 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加，蒸发量随湖区升温和湖体面积增加总体呈显著增加趋势。（2）20世纪80年代中期以前伊塞克湖大部分年份湖泊水量呈负平衡，地下水持续补给湖泊，1986年起湖泊的水量收支亏损逐渐减小，1998年以来以正平衡为主。（3）入湖径流、降水、蒸发等水量平衡分量的互动关系决定了湖泊水量的变化，而产流区气候变化和灌区灌溉引水通过改变入湖径流间接驱动湖泊水量的变化；1960—1986年，以灌溉引水为主的人类活动是驱动伊塞克湖水量变化的主导因素，贡献率达71.6%，1987年以来，气候变化因子对湖泊水量变化的累计贡献超过80%。

关键词：伊塞克湖；水量平衡；入湖径流；气候变化

亚洲中部干旱区是全球内陆湖泊分布密集的地区之一，其中1 km^{2}以上的湖泊有3000多个，100 km^{2}以上的大型湖泊60多个[1]。在全球气候变暖的大背景下，中亚气候变化及其水文响应研究得到了科学界的广泛关注[2]。特别是中亚干旱区的内陆湖泊，不仅是区域气候变化的指示器，也是水循环的重要组成部分，探讨内陆湖泊水量收支变化及其对变化环境的响应，对认识干旱区气候水文变化规律有重要意义。

近几十年来，中亚干旱区内陆湖泊发生了剧烈的变化，并存在明显差异[3]，而影响内陆湖泊变化的原因较为复杂，既有气候波动的因素，也有人类活动的因素，同时还受湖泊大小、形态、海拔高度、下垫面特征和水文循环等影响。总的来说，高山封闭湖位于高山的低洼盆地之中，部分湖泊具有稳定的冰川融水补给，受人类活动干扰较小，对区域气候变化响应敏感[1]，如赛里木湖、阿牙克库木湖和阿其克库勒湖等；而在平原区，内陆河流域农业灌溉引水和蓄水改变了水资源的时空分布，使得原来可以流入下游尾闾湖泊的部分或全部径流消耗在了平原绿洲区，导致旱区尾闾湖泊水量平衡发生剧烈变化，当人类活动的干扰大于气候因素的影响时，则表现为面积萎缩、水位降低和水量减小，如咸海、博斯腾湖和阿拉湖等。伊塞克湖是中亚最大的高山封闭湖泊，发源于昆格阿拉套山和杰斯克耶山的100多条河流流向伊塞克湖；19世纪后期以来，随着引水垦荒，许多河水在未流入湖之前被用来灌溉田地。伊塞克湖的变化体现了气候变化因素和人类

收稿日期：2022-01-22；　**修订日期：**2022-08-25
基金项目：中国科学院A类战略性先导科技专项泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设（XDA20060301）；王宽诚教育基金（GJTD-2020-14）；中国科学院国际合作项目（131551KYSB20160002，131965KYSB20200029）；中国科学院交叉创新团队（JCTD-2019-20）；2021年江苏省双创博士项目（JSSCBS20210862）；无锡学院人才启动项目（550221020）
作者简介：王晓飞（1997-），女，硕士研究生，主要从事空间水文学过程研究. E-mail: wangxiaofei201@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：黄粤. E-mail: huangy@ms.xjb.ac.cn

活动干扰的复合影响，且具有明显的阶段性特征。已有研究表明，近代以来伊塞克湖水位总体呈下降趋势[4-9]，变化过程可以分为波动下降-快速下降-缓慢波动上升3个阶段[10]；湖泊面积变化与水位变化有较强的同步性，呈先减小后增加的趋势[1,11-12]。20世纪80年代以前引水灌溉导致了伊塞克湖水位持续下降[4, 5, 13-14]；1987年以来，中亚地区气候发生变化，主要表现为降水量、冰川融水量和河川径流量显著增加，间接促进了湖泊水位上升[15]。然而，以往研究大多分析面积或水位单一水文要素变化及其驱动因素[16-17]，且数据主要集中于2010年以前，缺少对伊塞克湖近期变化的研究，特别是对湖泊水量平衡分量和收支状态的变化，以及水量平衡各分量对湖泊水量的定量贡献等尚不明确。

因此，本文选择伊塞克湖作为研究区，基于1990—2020年Landsat TM/ETM+/OLI、Jason1/2/3等遥感影像数据，提取湖泊面积、水位信息，结合历史观测数据，重建长时序面积和水位变化序列，反演伊塞克湖水量；选取伊塞克湖流域乔尔蓬阿塔气象站1960—2000年气象数据对1960—2020年CRU再分析气象数据进行修正，建立湖泊水量平衡模型，定量分析降水、蒸发、入湖径流与湖泊水量等多要素变化及其互动关系，分析气候变化和人类活动关键因子对伊塞克湖水量变化的贡献。研究结果可为伊塞克湖流域水资源调控和生态保护提供数据支撑。

1　研究区概况

伊塞克湖位于吉尔吉斯斯坦天山北坡的封闭性山间盆地中(图1)，属内陆咸水湖。湖心位于77.33°E，42.42°N附近，湖面平均海拔1607.03 m，湖岸线周长约669 km，平均深度278.4 m，最大深度约702 m，湖水体积17350×10^8 m^3，总面积约6236 km^2[18]。湖区位于大陆性气候带中部，气候温和干燥，1月平均气温-6 ℃，7月平均气温15~25 ℃，湖面年均蒸发量约820 mm，年降水200~300 mm。湖周山谷环抱，北侧为Kungey Alataw山脉，海拔4700 m；南侧为Terskey Alataw山脉，最高海拔5200 m。这些山脉围成了约22080 km^{2}的集水流域[18]。流域内冰川面积约650.4 km^2，有102条河流汇入该湖。伊塞克湖为高山封闭内陆湖，许多河水在未汇入湖之前就被用于灌溉等生产活动，但河流不是唯一的补给来源，每年湖泊平均地表水补给量约为13×10^8 m^3，平均地下水补给量约为20×10^8 m^3[10]。

2　材料与方法

2.1　数据收集

基于30 m分辨率的Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像提取了1990—2020年伊塞克湖面积变化时间序列，影像时相集中在5—8月。湖泊水位数据的获取分为2个阶段：1960—1991年和1992—2020年。前一阶段数据来自Romanovsky[6]的研究，后一阶段水位信息从TOPEX/Poseidon(T/P)卫星以及Jason1/2/3测高卫星数据产品中提取[8]。

选取距离伊塞克湖最近的气象站乔尔蓬阿塔(海拔1645 m)为代表站，气象站点数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)[19-20]，数据参量为逐月平均气温和逐月降雨量，

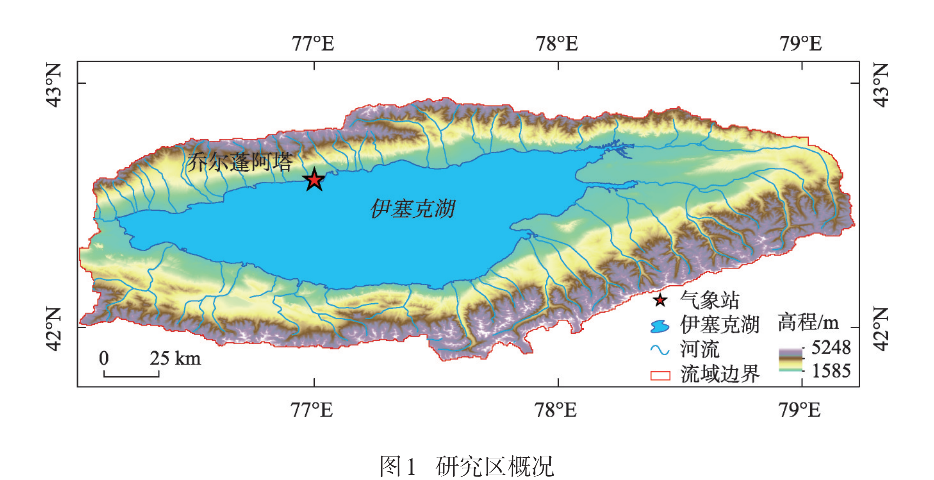


图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

时段为1960—2000年。2001—2012年月平均气温和月降水数据由伊丽努尔·阿力甫江等[16]的研究提供。因地理条件限制及政策原因,相关数据缺失严重,需要利用气象再分析数据进行补全。采用英国East Anglia大学Climatic Research Unit(CRU)发布的CRU TS 4.05数据(http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/),空间分辨率为0.5°×0.5°,时段为1960—2020年,所用数据参量包括逐月平均气温、逐月降水量。

土地覆盖数据来自欧洲太空局Climate Change Initiative(CCI)(https://www.esa-landcover-cci.org),空间分辨率为300 m×300 m,用于提取1990—2015年伊塞克湖流域耕地面积变化时序;1960—2000年入湖流量观测数据由王国亚等[18]的研究提供;2001—2017年径流数据来自Uwamahoro等[21]对伊塞克湖流域水文模拟的结果;湖面蒸发观测数据来自CAwater(http://www.cawater-info.net/index_e.htm);冰川面积数据来自中国科学院"地球大数据科学工程数据共享服务系统"提供的1990年、2000年、2010年、2015年4期中亚土地利用与覆盖数据(http://data.casearth.cn/)[22];研究区水系数据来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心[23];伊塞克湖流域年平均灌溉耗水量来自王国亚等[10]的研究,数据时段为1935—2000年。

2.2 湖泊水量计算

基于1990—2020年Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像,采用"全域-局部"自适应迭代的阈值分割方法提取湖泊面积信息[24],并加以人工修订,得到1990—2020年多期湖泊面积变化序列。由于伊塞克湖面积与水位变化的同步性较强,可根据Romanovsky[6]的研究提供的历史水位数据,推求出1960—1989年间的面积变化时间序列。根据遥感提取的水位、面积时间序列,估算伊塞克湖储水量[25]。

2.3 湖面蒸发计算

采用位于伊塞克湖北侧的乔尔蓬阿塔站实测数据(气温、日照时数等)计算湖面蒸发。Penman-Monteith公式无论在湿润区还是在干旱区表现较好[26],但所需参数包括最高气温、最低气温、风速、日照时数、相对湿度等,对气象资料的完整性有很高的要求,一定程度上限制了该公式的使用;Hargreaves方法仅基于温度和地理位置即可计算蒸散发,且经过校正后结果较为合理[27]。本研究使用Hargreaves公式(以下简称H氏公式)计算湖面蒸发量,H氏公式所需参数有日平均最高气温、日平均最低气温以及外空辐射[28],其中日平均最高气温和日平均最低气温数据由气象站提供,外空辐射资料可以根据纬度查阅FAO相关文献得到。

$$W = A \times ET_{0H} \tag{1}$$

$$ET_{0H} = 0.0023 R_a (T + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \tag{2}$$

式中:W为湖泊蒸发总量(m^3);A为湖泊的面积(m^2);ET_{0H}为应用H氏公式计算的参考蒸散量($mm \cdot d^{-1}$);R_a为与外空辐射等价的水量($mm \cdot d^{-1}$);T为日平均气温(℃);T_{max}为日平均最高气温(℃);T_{min}为日平均最低气温(℃);0.0023为初始公式的经验值。

2.4 降水和气温时间序列重建

站点实测数据精度高,但在反映气温、降水时空特征方面有局限性;CRU格网数据能够反映降水和气温的时空分布特征,但是有一定的系统误差。因此有必要对格点气温和降水数据进行修正,弥补不足[29]。

本文将1960—2000年作为拟合期,2001—2012年作为验证期,采用逐月比例缩放法[30]来修正2013—2020年时段内CRU降水量序列,公式如下:

$$a_i P_i = O_i \tag{3}$$

$$\bar{p}_{cor} = \bar{a}(p_i) \tag{4}$$

式中:i为月份,取1,2,···,12;a_i、$\bar{a}$分别为实测与模拟的月降水比值和平均比值;P_i为拟合期CRU月平均降水量,mm;O_i为拟合期气象站点月平均降水量,mm;p_i为未修正时段CRU月降水量,mm;$\bar{p}_{cor}$为修正后的CRU月降水量,mm。

为了评价误差校正后的再分析数据在研究区伊塞克湖流域的适用性,采用相对误差指标和Pearson相关系数(R^2)作为评判标准。相对误差(ARE)计算公式为:

$$ARE = \left| \frac{N_{sim} - N_{obs}}{N_{obs}} \right| \times 100\% \tag{5}$$

式中:N_{sim}为模拟值;N_{obs}为观测值。

温度序列重建采用线性比例缩放法[31],将1960—2000年时段内站点月平均气温作为实测值,将CRU月平均气温作为模拟值,公式如下:

$$T_{cor} = T + (\mu_{obs} - \mu_{sim}) \tag{6}$$

式中:T_{cor} 为校正后气温,℃;T 为校正前模拟气温,℃;μ_{obs} 为站点实测气温,℃;μ_{sim} 为模拟气温值,℃。

将2001—2012年时段内站点数据与校正后的CRU数据对比分析,检验校正后的CRU数据的有效性。

从表1可以看出,经过校正的CRU降水数据与站点数据的相关性有所提高,R^2从0.63提高到0.74,相对误差从30.91%下降到12.51%,经过校正后的CRU温度数据与实测年均气温误差在5%以内,说明经过校正后的CRU降水和气温序列能达到精度要求[32],校正结果可信度高,该重建时间序列方法在研究区适用。

表1 温度和降水时序重建结果精度评价

Tab. 1 Accuracy evaluation of temperature and precipitation time series reconstruction results

	校正前		校正后	
	R^2	ARE/%	R^2	ARE/%
气温	0.78	104.86	0.78	3.71
降水	0.63	30.91	0.74	12.51

2.5 水量平衡模型

某时段湖泊库容差与增(减)水的关系,可用水量平衡方程式[33]表示:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t}=A(h)(P-E)+Q_{in}-Q_{out} \tag{7}$$

式中:Δt 为计算时段(a);ΔV 为湖泊库容变化量(m^3);A 为湖泊水面面积(m^2),A 是水位 h 的函数;P 为研究区内降雨量(mm);E 为研究区内总蒸发量(mm);Q_{in} 为入湖水量(m^3);Q_{out} 为出湖水量(m^3)。

由于伊塞克湖属于封闭湖泊,没有出水河流,根据伊塞克湖流域实际情况,将水量平衡方程表示为:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta V}{\Delta t}&=A(h)(P-E)+Q_{河流入}+Q_{地下入}-Q_{地下出}\\&=A(h)(P-E)+Q_{河流入}+Q_{余项}\end{aligned} \tag{8}$$

式中:$Q_{河流入}$ 为河流入湖水量(m^3);$Q_{地下入}$、$Q_{地下出}$ 为地下水入、出湖水量(m^3)。

余项表示为:

$$Q_{余项}=Q_{地下入}-Q_{地下出} \tag{9}$$

3 结果与分析

3.1 伊塞克湖面积、水位与水量变化

伊塞克湖面积与水位变化的同步性较强,呈先下降后上升的总趋势(图2)。如图2a所示,1960—1986年,伊塞克湖面积快速减小,1987年起湖泊面积减小的趋势减缓,但由于1997年流域降水量为近60 a最低,仅为148.1 mm(图3),导致1998年湖泊面积较1960年减少34.91 km^2,水位降至1606.17 m;1998年后随着降水量增加湖泊水位和面积变化转为上升趋势,至2011年面积持续增加至6213.72 km^2,水位增加到1607.84 m,此时湖泊水位基本恢复到1960年前后水平;2011—2020年湖泊面积、水位小幅波动下降,维持在6210.09 km^2和1607.63 m左右。

伊塞克湖属于高山内陆湖泊,湖盆由地壳陷落形成,楔形湖盆决定了湖泊水量的变化不会太剧烈。如图2b所示,1960年以来,湖泊水量最大变化不超过86×10^8 m^3,相比于16000 ×10^8 m^3以上的总水量来说,变化很小。水量的变化趋势与水位、面积

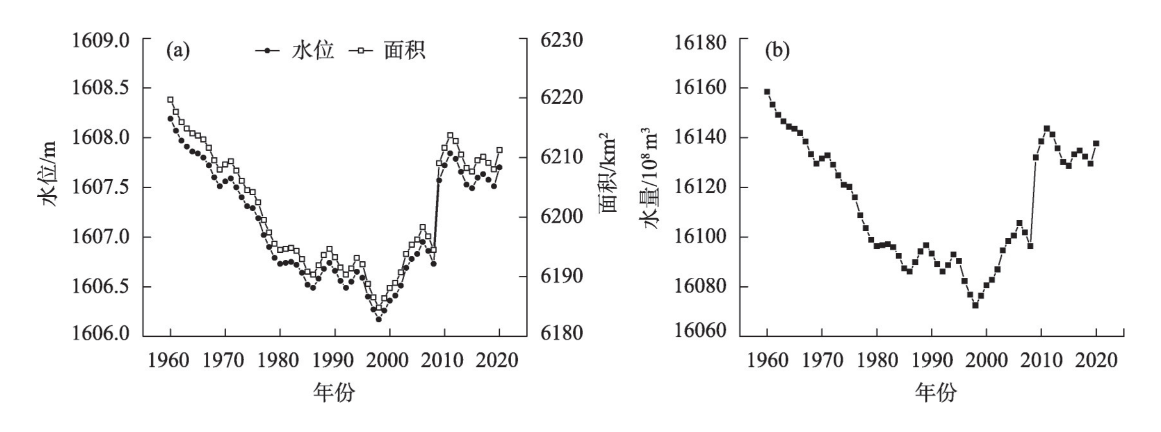


图2 1960—2020年伊塞克湖水位、面积和水量变化

Fig. 2 Changes in water level, area and volume of Issyk-Kul Lake from 1960 to 2020

的变化一致，1960—1998年期间持续减少，减少速率约 $2.1\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$。1998—2006年间入湖流量每年约增加 $0.084\times10^8\ m^3$，湖泊水量处于缓慢上升阶段，至2006年增加到 $16105.7\times10^8\ m^3$。2006—2008年水量小幅减少 $9.4\times10^8\ m^3$，2009—2011年年均降水量334.26 mm，高于多年平均降水量约54 mm，水量迅速增加，2011年达到 $16143.6\times10^8\ m^3$，与1966年水量持平。此后水量呈小幅波动变化，变化率为 $-3.8\times10^8\ m^3\cdot(10a)^{-1}$。

3.2 伊塞克湖水量平衡分量变化

3.2.1 降水变化 伊塞克湖湖区多年平均降水量为279.8 mm；1960年至今降水量呈增加趋势，增幅率 $9.1\ mm\cdot(10a)^{-1}$（图3）。其中1993—1997年降水量显著下降，由1993年的420.2 mm降低到1997年的148.1 mm，也是近60 a降水量最低值。1998—2005年降水量以 $3.7\ mm\cdot a^{-1}$ 的幅度持续增加。此后呈现波动增加趋势，至2020年降水量达到了321.8 mm，是多年平均降水量的1.2倍左右。

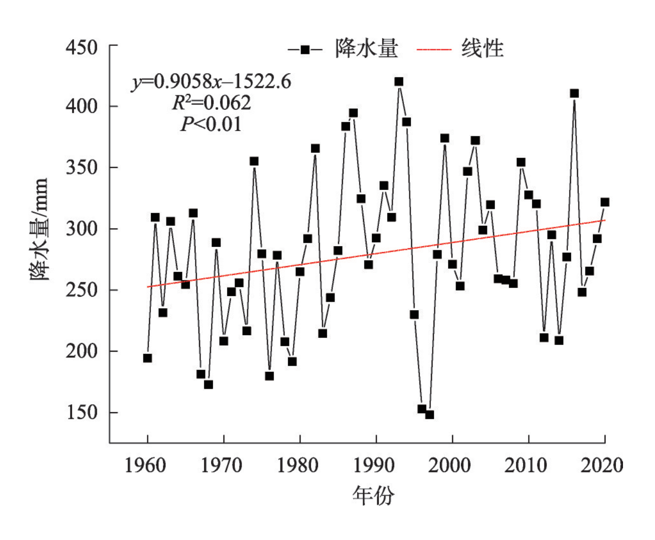


图3 1960—2020年伊塞克湖降水量变化

Fig. 3 Precipitation change in Issyk-Kul Lake from 1960 to 2020

3.2.2 湖面蒸发变化 由图4可知，湖面蒸发与湖区气温变化有较强的同步性。1960—2017年间，多年平均蒸发量约927.6 mm，与CAwater发布的观测蒸发量相近；湖面蒸发量总体呈显著增加趋势（显著性水平 $\alpha=0.01$），增幅为 $15.7\ mm\cdot(10a)^{-1}$。1960—1985年，湖泊水面蒸发维持在较为稳定的状态，平均约911.7 mm；1986—1993年间蒸发量波动较大；1993年后随着湖区气温升高，湖面蒸发波动增加；1994—2002年年均蒸发量达972.5 mm；2003—2017

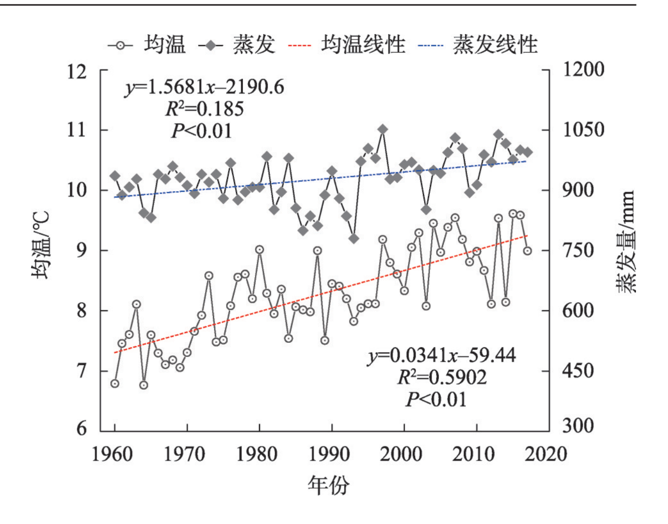


图4 1960—2017年伊塞克湖蒸发量变化

Fig. 4 Changes in evaporation from Issyk-Kul Lake, 1960–2017

年，蒸发量以 $5.8\ mm\cdot a^{-1}$ 的速率显著增加（显著性水平 $\alpha=0.01$）。

3.2.3 入湖径流 如图5所示，近60 a伊塞克湖入湖流量总体呈增加趋势，年际变化范围在 $30.23\times10^8\ m^3\sim49.62\times10^8\ m^3$ 之间，多年平均入湖径流量为 $39.41\times10^8\ m^3$。由M-K检验结果可知，1986年入湖径流量发生了由减少到增加的突变，这一时间拐点与中亚气候由"暖干"向"暖湿"转变的突变时间基本一致[15]。1986年流域降水量迅速增加，相较1985年增加了 $6.27\times10^8\ m^3$；加上升温导致冰雪融水对径流的补给增加，是入湖流量由持续减少转变为增加趋势的主要原因。从2个阶段来看，1960—1986年伊塞克湖流域降水量总体处于较低水平，入湖流量主要受农业灌溉引水影响持续减少。王亚国等[18,34]指出，1950—1980年代中期灌溉用水量在伊塞克湖盆地耗水量中占比最大，扰乱了地下水和地表水的自然交换。1987年起，流域降水在大部分年份维持在较高水平；1989—1992年农业、工业、城市用水量分别下降了66%、36%、64%[35]，流域耗水总量与1977—1989年相比减少了53.49%；直至2015年研究区内灌溉耗水量处于稳定状态。径流补给量激增与灌溉引水减少的双重作用使得入湖流量维持了逐步回升的趋势，至2008年入湖流量达到了 $49.07\times10^8\ m^3$；2010—2015年降水量减少，入湖流量也随之下降了 $12.8\times10^8\ m^3$，此后受降水回升和冰川消融的影响，入湖径流量迅速增加，到2017年入湖径流量达到 $44.61\times10^8\ m^3$，高于多年平均入湖径流量

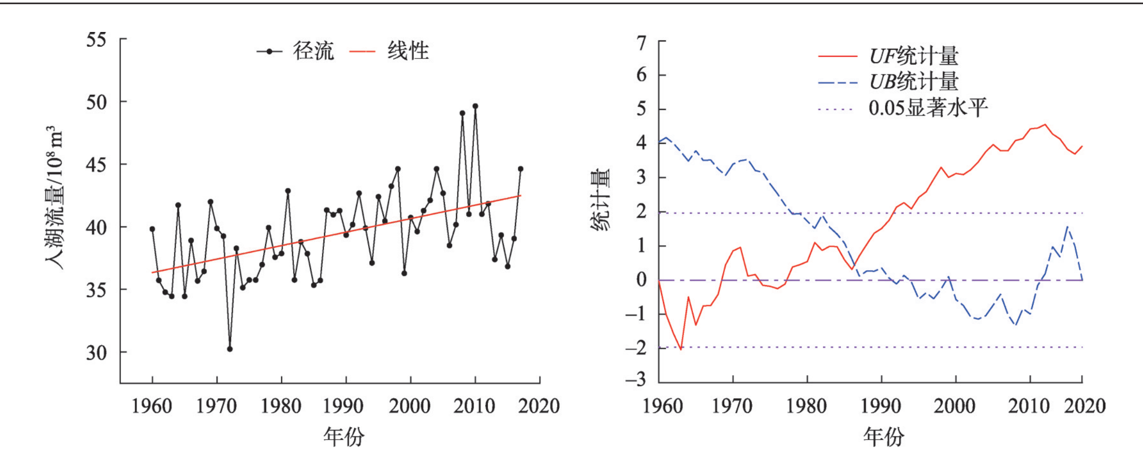


图5 1960—2017年伊塞克湖入湖流量变化

Fig. 5 Change of the inflow to Issyk-Kul Lake from 1960 to 2017

约5.2×10^8 m^3。

3.2.4 余项 依据水量平衡公式,余项可近似为地下水的变化量,反映伊塞克湖与地下水的互动关系。如图6a所示,1960—1986年间大部分年份伊塞克湖水量平衡余项为负值,湖泊显示了负平衡,表明地下水持续补给湖泊,除1964年、1969年、1982年外,地下水对湖泊的平均补给量约4.5×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$,其中1976年地下水补给最多,补给量13.2×10^8 m^3;除1990年外,1986—1994年间水量平衡余项均为正值,湖泊水量收支为正,表明这些年份以湖泊补给地下水为主。1995—2020年,余项在-12.7×10^8 m^3~13.2×10^8 m^3之间波动变化。

伊塞克湖水量平衡余项的年代变化如图6b所示,20世纪80年代以前,湖泊水量基本处于负平衡状态,地下水持续补给湖泊,其中70年代地下水补给较多,平均为4.76×10^8 m^3 a^{-1};20世纪80年代到21世纪10年代湖泊水量处于盈余的状态,地表径流和降水的补给能够维持湖泊的水量平衡。

由图7可知,1980年以前降水、入湖流量、蒸发量和水量平衡余项均为负距平,说明该时段水量平衡各分量均偏低,湖泊水量处于负平衡状态,湖泊水位持续下降;1980—1989年降水量为正距平,入

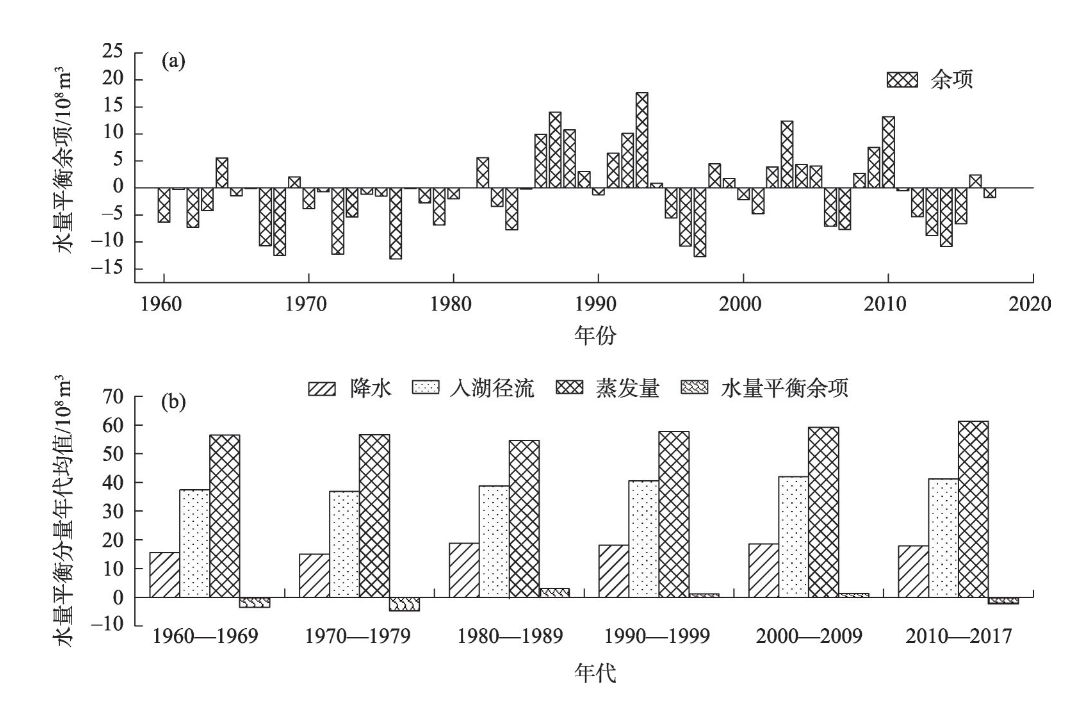


图6 1960—2017年伊塞克湖水量平衡年际变化(a)和年代变化(b)

Fig. 6 Inter-annual (a) and chronological (b) change of water balance in Issyk-Kul Lake, 1960–2017

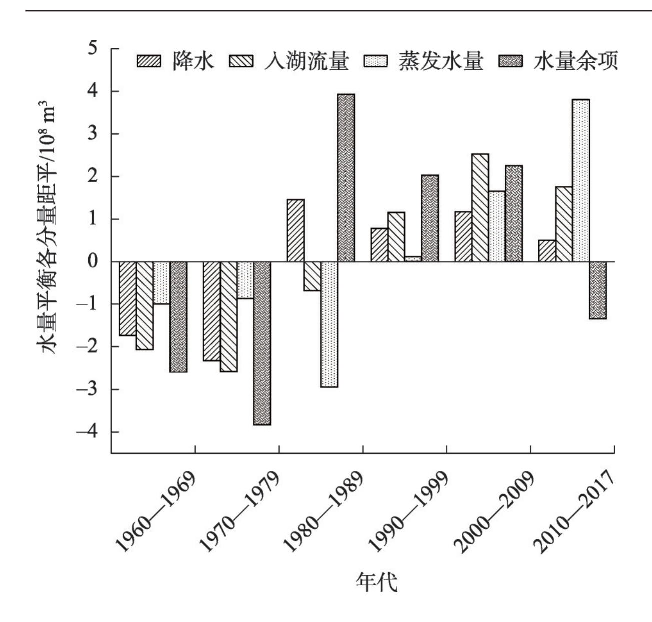


图7 1960—2017年伊塞克湖水量平衡各分量年代距平

Fig. 7 Chronological distance of each component of the water balance of Issyk-Kul from 1960-2017

湖流量和蒸发量为负距平，表明期间降水增多，入湖流量减少，降水量的增加抵消了入湖流量减少的部分影响，加上湖面蒸发量减少导致水量平衡余项为正距平，期间湖泊水量处于盈余状态，对应1986年后伊塞克湖水位不再继续下降，而是在波动中维持稳定（图2a）；1990—2009年湖泊水量平衡各分量均显示为正距平，期间湖泊水位回升；2010—2017年降水量、入湖水量和蒸发量距平为正，但湖面蒸发的增量超过降水量与入湖流量的增量之和，导致这一阶段湖泊水量处于负平衡状态，地下水少量补给湖泊。

4 讨 论

伊塞克湖是地处高山盆地的封闭内陆湖，湖水来源包括大小河流的汇入、降水以及地下水的补给（水量收入），湖体水面蒸发是水量耗散的主要途径（水量支出）；而从流域尺度来看，产流区的气候变化和湖周绿洲区以灌溉引水为主的人类活动，通过影响入湖流量间接驱动湖泊水量的变化。

沈永平等[36]的研究指出，北大西洋涛动与欧亚大陆北部上空的西风环流正相关，北大西洋涛动指数1956—1971年是持续负位相期，1972—1986年处于正负波动期，而1987—2000年基本是持续正位相期，水汽增加可能是中亚地区降水增加的主要原因。与此同时，20世纪80年代初期，中亚气温变化倾向率达0.369 ℃·$(10a)^{-1}$，变化幅度（−1.3~1.5 ℃）远大于全球气温的变化幅度（−0.6~0.55 ℃）[37]。冰川处于持续的负物质平衡而不断退缩，亚洲高山区负物质平衡（−150±110 kg·m^{-2}·a^{-1}）[38]。围绕伊塞克湖的100多个山区子流域是主要产流区，流域气候变化趋势与中亚地区的整体趋势具有较强的一致性。1960年以来，产流区气温呈波动上升趋势显著，且1986年后升温速率明显高于前期；1960—1985年间降水量呈波动变化，1986年起迅速增加且波动剧烈，1986—2020年降水量较前期平均增加29.34 mm·a^{-1}（图8a）。随着高山区升温加剧，冰雪融水对径流的补给量增加，气温对湖泊变化的正效应凸显[15]。一些学者基于典型冰川的观测数据，揭示了伊塞克湖流域冰川物质平衡减少的事实[6, 39-40]。1958—2016年伊塞克湖北部的土尤克苏冰川表面平均下降23.2±2.2 m，消失了约67.7±6.7×10^6 m^3[40]。Romanovsky[6]指出1973年开始，位于伊塞克湖南侧的帖尔斯克伊山（Terskei Ala-Too）上的卡拉·巴特卡克（Kara-Bat-kak）冰川物质平衡为负，这期间所有基于雪、冰川补给的河流都观测到了冰川径流的增加，约4 km^3冰川体积的融化增加了入湖径流，这相当于流域内8.3%的冰川。本文提取1990年、2000年、2010年和2015年伊塞克湖流域冰川面积（图8b），结果表明1990—2015年流域冰川面积持续减少，由1990年的691 km^2减少至2015年的647 km^2，减小速率约1.26 km^2·a^{-1}。王国亚等[18]的研究表明，1935—2000年伊塞克湖入湖径流量呈增加趋势，变化速率为9.2 mm·$(10a)^{-1}$；1975年以后增加趋势更为明显，为24.4 mm·$(10a)^{-1}$。这与1980年代以来，湖泊水位波动回升的趋势相一致，说明产流区降水和冰雪融水增加导致入湖径流量增加，驱动了伊塞克湖水量由负平衡到正平衡的转变。

以灌溉引水为主的人类活动也是影响伊塞克湖入湖水量的重要因素。伊塞克湖流域土地利用开发可追溯至19世纪后期至20世纪中期，伊塞克湖盆地引水垦荒[18]。1930年流域灌溉面积仅为500 km^2，20世纪50年代至1980年代中期灌溉面积增至1540 km^2[10]；这与1960—1986年期间入湖流量持续减少和湖水水位快速下降相一致。施雅风[39]指出，1935—1980年间伊塞克湖地表和地下径流补给明显减少，灌溉引水量、灌区蒸散发量以及湖面蒸发量上升，致使伊塞克湖水位明显下降。邵新媛[4]

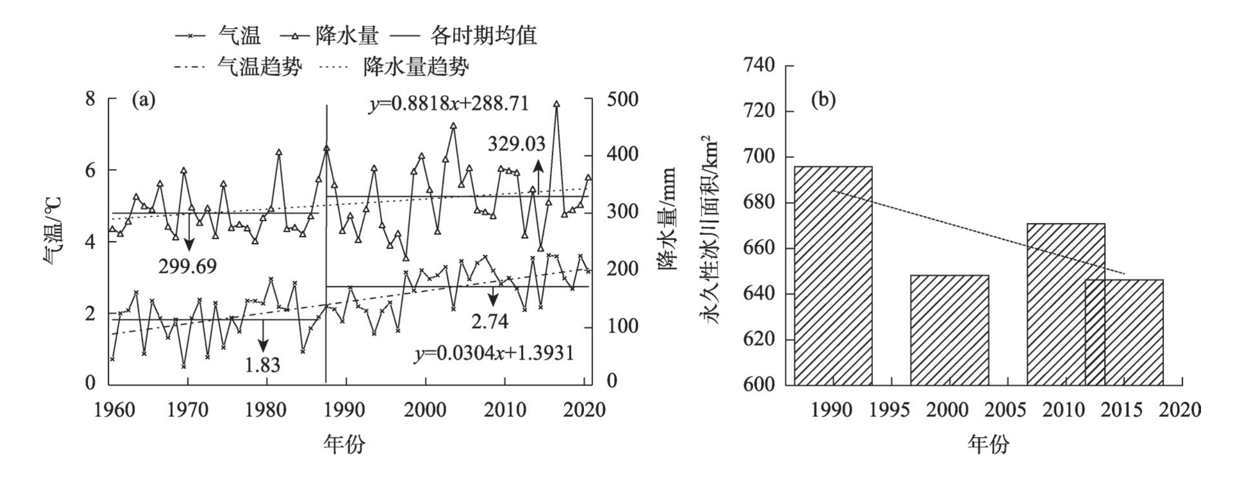
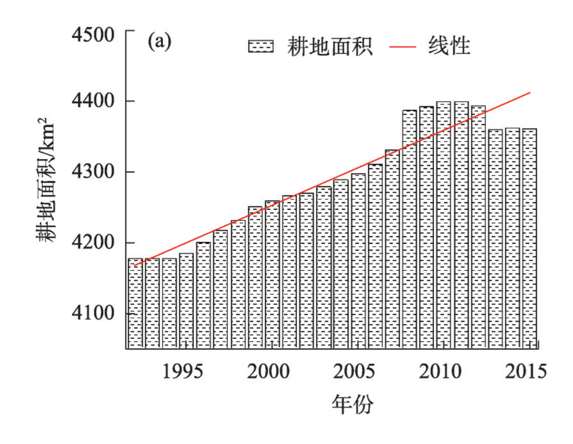


图8 1960—2020年伊塞克湖流域气温、降水量变化(a)和1990—2015年冰川面积变化(b)

Fig. 8 Changes in temperature and precipitation in the Issyk-Kul from 1960 to 2020 (a) and change in glacier area from 1990 to 2015 (b)

的分析结果表明,1927—1983年由于农田用水、工业用水和城市生活用水,伊塞克湖入湖水量每年减少约6.0×10^8 m^3,导致湖水位每年下降约5 cm;其中1977—1989年间灌溉耗水较1935—1976年增加160%[10]。1989—1992年,耕地大范围撂荒,农业、工业、城市用水量分别下降了66%、36%、64%[35]。本文基于欧洲太空局土地利用变化数据提取1992—2015年伊塞克湖流域耕地面积变化(图9a),结果表明:1992年以来伊塞克湖流域耕地面积小幅增加了184.56 km^2,依据伊塞克湖流域净灌溉定额[4],结合1990—2000年的平均耗水量[10],计算得到2001—2015年间的平均耗水量为20.72×10^8 m^3(图9b),与1990—2000年间平均灌溉耗水量基本持平。

水量收入与支出间的互动关系决定了伊塞克湖的历史演变进程与未来趋势。入湖径流、降水、蒸散发等水量平衡分量的互动关系决定了湖泊水量的变化,而产流区气候变化和灌区灌溉引水通过改变入湖径流间接驱动湖泊水量的变化。因此,选取山区降水和气温、灌溉引水量、湖区降水和蒸发为主要驱动因子,通过析因分析法计算各因子对伊塞克湖水量变化的贡献率(表2),结果表明:气候变化与人类活动对伊塞克湖水量变化的影响阶段性差异显著,1960—1986年以灌溉引水为主的人类活动是驱动湖泊水量急剧减少的主导因素,贡献率达71.6%;1986年以来,气候的"暖湿"化变化,以及灌溉引水量的减少,促进了伊塞克湖水位持续升高,并进入稳定恢复的状态,气候变化因子的累计贡献达到80%以上。值得注意的是,在流域持续升温,且湖区升温幅度较大的情况下,湖泊面积增加必然导致蒸发量不断增大,湖区蒸发对水量变化的影响



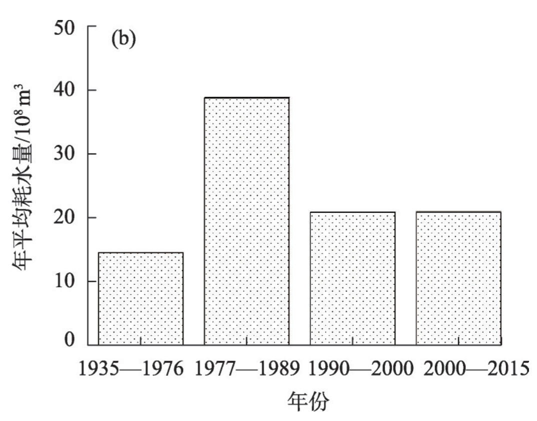


图9 1992—2015年伊塞克湖流域耕地面积变化(a)和1960—2015年伊塞克湖流域灌溉耗水量变化(b)

Fig. 9 Changes in cropland area in Issyk-Kul basin from 1992-2015 (a) and changes in irrigation water consumption in Issyk-Kul basin from 1960-2015 (b)

表2 各因子对伊塞克湖水量变化的贡献率

Tab. 2 Contribution of each factor to the variation of water volume in Issyk-Kul Lake

影响因子	贡献率/%	
	1960—1986年	1987—2017年
山区降水	15.17	22.11
山区气温	2.31	3.08
灌溉引水	71.64	13.85
湖区降水	10.34	15.72
湖区蒸发	0.55	45.25

加剧。这种情况在2010年后表现更为突出，蒸发耗散对湖泊水量的负效应明显超过入湖径流和降水的正效应，导致了近期伊塞克塞克湖面积、水位和水量的小幅波动减小。

5 结 论

本文以伊塞克湖为研究对象，基于多源遥感数据重建了近60 a湖泊面积、水位和水量变化时间序列，结合长时序气象、水文观测数据和土地利用数据等，分析了降水、入湖径流量、蒸发及地下水等水量平衡分量的变化特征，并定量解析了气候变化与人类活动多因素对伊塞克湖水量变化的影响。主要研究结论如下：

（1）1960年以来，伊塞克湖面积、水位与水量变化的同步性较强，呈先下降后上升的趋势；其中1960—1986年呈快速减小趋势，1987年起减小的趋势趋缓，至1998年后随着降水量增加湖泊水位和面积变化转为上升趋势；1998年为伊塞克湖水量变化的时间拐点。

（2）不同时期水量平衡及各要素的变化差异显著。1960—1986年伊塞克湖流域降水量总体处于较低水平，入湖流量主要受农业灌溉引水影响持续减少；1986年伊塞克湖流域降水较1985年显著增加，且此后在波动增加中保持较高的水量，同时持续升温加速了冰雪消融，导致入湖流量激增，1986年入湖流量发生了由减少到增加的突变。1986年以前大部分年份湖泊水量呈负平衡，地下水持续补给湖泊，其中1976年地下水补给最多；1986年起湖泊的水量收支亏损逐渐减小，1998年后随着入湖径流量和湖区降水量的增加，伊塞克湖水量平衡转为正增长。

（3）湖区尺度上，入湖径流、降水、蒸散发等水量平衡分量的互动关系决定了伊塞克湖水量的变化；流域尺度上，气候变化和人类活动通过改变入湖径流间接驱动湖泊水量的变化。以灌溉引水为主的人类活动是1960—1986年湖泊水量迅速减少的主导因素，1987年以来，气候变化因子对伊塞克湖水量变化的影响增强，降水量显著增加和持续升温导致的冰雪消融使得入湖流量激增，是这阶段湖泊水量变化趋势扭转并持续增加的主要原因；2010年后湖区蒸发耗散对湖泊水量的负效应明显超过入湖径流和降水的正效应，导致了近期伊塞克湖面积、水位和水量的小幅波动减小。

参考文献(References)：

[1] 成晨, 傅文学, 胡召玲, 等. 基于遥感技术的近30年中亚地区主要湖泊变化[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 146-152. [Cheng Chen, Fu Wenxue, Hu Zhaoling, et al. Changes of major lakes in Central Asia over the past 30 years revealed by remote sensing technology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(1): 146-152.]

[2] 姚俊强, 刘志辉, 杨青, 等. 近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 291-302. [Yao Junqiang, Liu Zhihui, Yang Qing, et al. Temperature variability and its possible causes in the typical basins of the arid Central Asia in recent 130 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 291-302.]

[3] 李均力, 包安明, 胡汝骥, 等. 亚洲中部干旱区湖泊的地域分异性研究[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 941-950. [Li Junli, Bao Anming, Hu Ruji, et al. Regional difference of lakes in the arid regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(6): 941-950.]

[4] 邵新媛. 伊塞克湖近期变化及其原因[J]. 干旱区地理, 1992, 15(2): 81-88. [Shao Xinyuan. The recent change of water level of Yiseke lake and its cause[J]. Arid Land Geography, 1992, 15(2): 81-88.]

[5] 米热古力·艾尼瓦尔, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 168-172. [Mihrigul Anwar, Hamid Yimit, Mamattursun Eziz, et al. Water level variations of Issyk-Kul lake based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 168-172.]

[6] Romanovsky V V. WaterLevel Variations and Water Balance of Lake Issyk-Kul. Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment[M]. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2002, 13: 45-58.

[7] 米热古力·艾尼瓦尔. 博斯腾湖和伊塞克湖水位变化对气候变化的响应对比研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014. [Mihrigul Anwar. Comparative Study on Water Level Change and Its Climate Change Response of Baghrash Lake and Issyk-Kul[D]. Urumqi:

Xinjiang University, 2014.]

[8] 李均力, 陈曦, 包安明. 2003—2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1219-1229. [Li Junli, Chen Xi, Bao Anming. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in Central Asia during 2003-2009[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1219-1229.]

[9] 阿依努尔·买买提, 玉米提·哈力克, 阿依加马力·克然木. 天山典型湖泊水位变化影响因素对比分析——以博斯腾湖与伊塞克湖为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 143-147. [Aynur Mamat, Umit Halik, Ayjamal Keram. Remote sensing based analysis on environment changes of typical lakes in Tian shan mountains: A case study of Bosten Lake and Issyk-Kul Lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(8): 143-147.]

[10] 王国亚, 沈永平, 王宁练, 等. 气候变化和人类活动对伊塞克湖水位变化的影响及其演化趋势[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1097-1105. [Wang Guoya, Shen Yongping, Wang Ninglian, et al. The effects of climate change and human activities on the lake level of Issyk-Kul during the past 100 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1097-1105.]

[11] 闫政新, 郭万钦. 1991—2014年中亚伊塞克湖湖泊面积变化遥感监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(2): 142-146. [Yan Zhengxin, Guo Wanqin. Remote sensing monitoring of the lake area of Issyk-Kul lake in Central Asia from 1991-2014[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2018, 41(2): 142-146.]

[12] 白洁, 陈曦, 李均力, 等. 1975—2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 80-88. [Bai Jie, Chen Xi, Li Junli, et al. Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975-2007: A remote-sensing analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 80-88.]

[13] 朱德祥. 伊塞克湖水资源问题[J]. 干旱区地理, 1988, 11(3): 84-86. [Zhu Dexiang. Water resources of Issyk-Kul Lake[J]. Arid Land Geography, 1988, 11(3): 84-86.]

[14] 秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(1): 11-19. [Qin Boqiang. A preliminary investigation of lake evolution in 20-century in inland mainland Asia with relation to the global warming[J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(1): 11-19.]

[15] 秦伯强. 气候变化对内陆湖泊影响分析[J]. 地理科学, 1993, 13(3): 212-219, 295. [Qin Boqiang. Analysis of the influence of climate change on inland lakes[J]. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13(3): 212-219, 295.]

[16] 伊丽努尔·阿力甫江, 吉力力·阿不都外力, 丁之勇, 等. 伊塞克湖典型小流域径流变化差异性及其影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 198-210. [Yilinuer Alifujiang, Jilili Abuduwaili, Ding Zhiyong, et al. Analysis of the difference of runoff variation and its influencing factors in typical small watershed of Issyk-Kul Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 198-210.]

[17] 尹仔锋, 尚华明, 魏文寿, 等. 基于树轮宽度的伊塞克湖入湖径流量重建与分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(4): 8-14. [Yin Zaifeng, Shang Huaming, Wei Wenshou, et al. Runoff reconstruction and analysis of Issyk-Kul Lake based on tree-ring width[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(4): 8-14.]

[18] 王国亚, 沈永平, 秦大河. 1860—2005年伊塞克湖水位波动与区域气候水文变化的关系[J]. 冰川冻土, 2006, 28(6): 854-860. [Wang Guoya, Shen Yongping, Qin Dahe. Issyk-Kul Lake level fluctuation during 1860-2005 and its relation with regional climatic and hydrological changes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(6): 854-860.]

[19] 沈永平. 1883—2001年(部分年份)吉尔吉斯斯坦逐月平均降水量数据. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn), 2019. [Shen Yongping. Monthly average precipitation data of Kyrgyzstan from 1883 to 2001 (partial years). National Cryosphere Desert Data Center(www.ncdc.ac.cn), 2019.]

[20] 沈永平. 1879—2003年(部分年份)中亚地区吉尔吉斯斯坦逐月平均气温数据. 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn), 2019. [Shen Yongping. Monthly average temperature data of Kyrgyzstan in Central Asia from 1879 to 2003 (partial years). National Cryosphere Desert Data Center (www.ncdc.ac.cn), 2019.]

[21] Uwamahoro Solange, Liu T, Nzabarinda Vincent, et al. Modifications to snow-melting and flooding processes in the hydrological model: A case study in Issyk-Kul, Kyrgyzstan[J]. Atmosphere, 2021, 12(12): 1580. https://doi.org/10.3390/atmos12121580.

[22] Pierre. (2020). 中亚五国土地利用类型数据集(2000, 2005, 2010, 2015). 国家青藏高原科学数据中心, 2020. [Pierre. (2020). Data set of land use types of five Central Asian countries (2000, 2005, 2010, 2015). National Tibetan Plateau Data Center, 2020.]

[23] 方晖. 中亚五国1:100万水系数据(2010年). 国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn), 2019. [Fang Hui. 1:1 million water system data of five Central Asian countries (2010). National Cryosphere Desert Data Center (www.ncdc.ac.cn), 2019.]

[24] 骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 604-615. [Luo Jiancheng, Sheng Yongwei, Shen Zhanfeng, et al. Step by step iterative multi-spectral remote sensing water information extraction with high precision[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 604-615.]

[25] 闫政新. 基于遥感影像的伊塞克湖泊变化研究[D]. 沈阳: 辽宁工程技术大学, 2016. [Yan Zhengxin. Based on Remote Sensing Image to Study on the Issyk-Kul Lake's Change[D]. Shenyang: Liaoning Technical University, 2016.]

[26] FAO. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements[J]. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, 1998.

[27] Huang Y, Ma Y, Liu T , et al. Climate change impacts on extreme flows under IPCC RCP scenarios in the mountainous Kaidu watershed, Tarim River Basin[J]. Sustainability, 2020, 12(5): 2090.

[28] Hargreaves G H, Samani Z A . Reference crop evapotranspiration

from temperature[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1(2): 96–99.

[29] Szczypta C, Calvet J-C, Albergel C, et al. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 647–666.

[30] 喻雪晴, 穆振侠. 降水资料匮乏地区不同再分析数据降尺度效果的评价[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 5–8, 23. [Yu Xueqing, Mu Zhenxia. Evaluation of downscaling effect of different reanalysis data in regions with insufficient precientation data[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 5–8, 23.]

[31] 罗敏. 干旱区气候变化对新疆典型流域水资源的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. [Luo Min. Study on the Climate Change in Arid Regions and Its Impact on Water Resources in Typical River Basing of Xinjiang[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.]

[32] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范: SL 250–2000[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting: SL 250–2000[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2000.]

[33] 昝婵娟, 黄粤, 李均力, 等. 1990—2019年咸海水量平衡及其影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1265–1275. [Zan Chanjuan, Huang Yue, Li Junli, et al. Analysis of water balance in Aral Sea and the influencing factors from 1990 to 2019[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1265–1275.]

[34] РОМАНОВСКИЙВ В, 秦伯强. 关于伊塞克湖水位下降的原因[J]. 湖泊科学, 1992, 4(3): 38–43. [РОМАНОВСКИЙВ В, Qin Boqiang. On decline of Issyk-Kul Lake level[J]. Journal of Lake Sciences, 1992, 4(3): 38–43.]

[35] Yilinuer Alifujiang, Jilili Abuduwaili, Ma Long, et al. System dynamics modeling of water level variations of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan[J]. Water, 2017, 9(12): 989.

[36] 沈永平, 刘时银, 丁永建, 等.天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 124–129. [Shen Yongping, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier mass balance change in Tailanhe River watersheds on the south slope of the Tianshan Mountains and its impact on water resources[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 124–129.]

[37] 沈伟峰, 缪启龙, 魏铁鑫, 等. 中亚地区近130多a温度变化特征[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 32–36, 42. [Shen Weifeng, Miao Qilong, Wei Tiexin, et al. Analysis of temperature variation in recent 130 years in Central Asia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 32–36, 42.]

[38] 康世昌, 郭万钦, 钟歆玥, 等. 全球山地冰冻圈变化、影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 143–152. [Kang Shichang, Guo Wanqin, Zhong Xinyue, et al. Changes in the mountain cryosphere and their impacts and adaptation measures[J]. Climate Change Research, 2020, 16(2): 143–152.]

[39] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J]. 地理学报, 1990, 45(1): 1–13. [Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend in Central Asia[J]. Acta Geographica Sinica, 1990, 45(1): 1–13.]

[40] Kapitsa V, Shahgedanova M, Severskiy I, et al. Assessment of changes in mass balance of the Tuyuksu group of Glaciers, northern Tien Shan, between 1958 and 2016 using ground-based observations and pléiades satellite imagery[J]. Frontiers in Earth Science, 2020, 8: 259.

Analysis of water balance change and influencing factors in Issyk-Kul Lake in recent 60 years

WANG Xiaofei[1,2,3], HUANG Yue[1,2], LIU Tie[1,2], LI Junli[1,2], WANG Zheng[1,2,3], ZAN Chanjuan[1,2,3], DUAN Yongchao[4]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of GIS & RS Application Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Wuxi University, Wuxi 214105, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the satellite data, the water level and area information of Lake Issyk-Kul was extracted, and the water volume was reconstruct; combined with CRU meteorological data from 1960−2020, the temperature and precipitation observation data from 1960−2000 at the Cholpon-Ata meteorological station and the water volume observation data into the lake, the lake water balance model was established to analyze the changing characteristics of each element of the water balance and to explore its influencing factors. The results indicated that: (1) Since 1960, the water volume of Issyk-Kul Lake has undergone a process of continuous decrease and fluctuating increase, with 1998 being the inflection point of the change; from the 1960s to the mid−1980s, the water volume into the lake decreased continuously mainly due to the influence of irrigation diversions, and then turned to an increasing trend after 1986 with the decrease of irrigation water and the increase of precipitation and glacial meltwater; precipitation in the lake area increased at a rate of 9.1 mm·$(10a)^{-1}$, and the evapotranspiration tends to increase significantly with increasing temperature and lake area. (2) Before the mid-1980s, Issyk-Kul had a negative water balance in most years, and groundwater continued to recharge the lake; since 1986, the water balance deficit of the lake gradually decreased, and since 1998, the positive balance has been dominated. (3) The interaction of water balance components such as runoff, precipitation and evaporation determines the changes in lake water volume, while climate change in the flow-producing areas and irrigation diversions in irrigation areas indirectly drive the changes in lake water volume by changing runoff; from 1960 to 1986, human activities, mainly irrigation diversions, were the dominant factor driving the changes in Issyk-Kul water volume, with a contribution of 71.6%, and since 1987 the cumulative contribution of climate change factors to changes in lake water volume exceeds 80%.

Keywords: Issyk-Kul Lake; water balance; runoff; climate change